DEC 30 1916

ÜBER DIE WECHSELSTROMENTLADUNG GERINGER STROMSTÄRKE ZWISCHEN METALLELEKTRODEN.

REMOTE STORAGE

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT ZU GÖTTINGEN

VORGELEGT

VON

E. MERKEL
AUS GÖTTINGEN.

GÖTTINGEN 1913

LEIPZIG
JOHANN AMBROSIUS BARTH
1913

Von der mathematisch-naturwissenschaftlichen Abteilung angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung: 6. August 1913.

Referent: Herr Professor Dr. H. Th. Simon.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

M54u
REMOTE STORAGE

Inhalt.

Seite

I. Einleitung 5

II. Gang der Untersuchung 6

III. Versuchsanordnung 8

a) Oszillograph 8

b) Schaltung 8

c) Funkenstrecke 9

IV. Qualitative Untersuchungen 11

V. Quantitative Untersuchungen 15

VI. Zusammenfassung der Beobachtungen 25

VII. Diskussion 25

Digitized by the Internet Archive
in 2016 with funding from
University of Illinois Urbana-Champaign

https://archive.org/details/uberdiewechselst00merk

I. Einleitung.

Die Dynamik des Lichtbogenvorganges, wie sie von H. Th. Simon begründet und durch seine und seiner Schüler Arbeiten ausgebaut worden ist[1]), hat für viele Erscheinungen dieser Gasentladungsform eine einheitliche und exakte Aufklärung gebracht. Auch die von M. Wien[2]) entdeckte Stoßerregung gekoppelter Kreise durch die sogenannte Löschwirkung des Funkens findet, wie Simon von Anfang an in seinen Vorlesungen hervorgehoben und neuerdings in der Literatur ausgeführt hat[3]), seine einfache Erklärung, wenn man für die kurzen Metallichtbögen der Löschfunkenstrecke dasselbe Verhalten der dynamischen Charakteristik annehmen darf, wie es beim Kohlelichtbogen gefunden ist. Die Löschwirkung wird dann dadurch bedingt, daß mit abnehmender Stromamplitude die Zündspitzen wachsen[4]), auf deren Bedeutung für die Löschwirkung neuerdings auch Roschansky hingewiesen hat.[5])

Von dieser Auffassung nahm die vorliegende Untersuchung ihren Ausgang, indem mir Hr. Professor Simon die Anregung dazu gab, die Charakteristik ganz kurzer Metallichtbögen im Hinblick auf die Löschfunkenwirkung zu studieren; und zwar sollte das Verhalten zuerst bei niederen Frequenzen mit Hilfe des Oszillographen, später bei höheren Frequenzen mit Hilfe der Braunschen Röhre untersucht werden.

---

1) H. Th. Simon, Physik. Zeitschr. **6**. p. 297. 1905, **7**. p. 433. 1906; Jahrb. d. drahtl. Telegr. etc. **1**. p. 16. 1907: H. Barkhausen, Das Problem der Schwingungserzeugung. Diss. Leipzig 1907; K. W. Wagner, Der Lichtbogen als Wechselstromerzeuger. Diss. Leipzig 1910. G. Lange, Beiträge zur Kenntnis der Lichtbogenhysteresis. Diss. Leipzig 1909.

2) M. Wien, Ann. d. Phys. **25**. p. 625. 1908.

3) H. Th. Simon, Handwörterbuch der Naturwissenschaften, Artikel: Elektrische Schwingungen.

4) H. Th. Simon, Physik. Zeitschr. **6**. p. 309. 1905.

5) Roschansky, Physik. Zeitschr. **13**. p. 935. 1912.

Indessen zeigte sich bald bei den oszillographischen Beobachtungen eine Erscheinung, welche die Aufmerksamkeit fesselte und Aufklärung erheischte, ehe die vorgenannte umfassendere Aufgabe in Angriff genommen werden konnte. Von einem bestimmten Elektrodenabstand an abwärts traten nämlich in den Werten der Zündspannung große Unregelmäßigkeiten auf, die es unmöglich machten, irgend welche Gesetzmäßigkeit zu erkennen; die oszillographischen Aufnahmen Figg. 3 und 4 (S. 13) geben eine Anschauung von diesem Verhalten.

Ähnliche Beobachtungen hat auch früher schon G. Lange[1]) gemacht, ohne jedoch näher darauf einzugehen. Ferner steht offenbar hiermit in engem Zusammenhange eine von Guye und Monasch[2]) mitgeteilte Anomalie im Verhalten von Wechselstromentladungen kleiner Stromstärke zwischen Metallelektroden. Guye und Monasch maßen die Effektivspannung an den Elektroden bei konstanter Stromstärke in Abhängigkeit von dem Elektrodenabstande; dabei stellte sich als normal eine lineare Beziehung zwischen diesen beiden Größen heraus. Von einem gewissen Elektrodenabstande an begann jedoch die effektive Spannung mit abnehmendem Abstande anstatt linear zu fallen, zu steigen und ganz unregelmäßige Werte anzunehmen, so daß Messungen nicht mehr ausgeführt werden konnten. Diese Anomalie trat bei allen reinen Metallen zwischen Null und etwa 3 mm auf; ein Bereich, den Guye und Monasch „kritische Zone" nannten. — Die Aufklärung dieser Erscheinung wurde schließlich das Ziel der vorliegenden Arbeit.

II. Gang der Untersuchung.

Zunächst wurde der Strom- und Spannungsverlauf des Wechselstromlichtbogens zwischen Metallplattenelektroden oszillographisch aufgenommen. Dabei zeigte sich (Fig. 1) die von manchen Autoren schon früher vermutete, von Barkhausen durchs Experiment bestätigte Tatsache wieder, daß die Spannung nach der Zündung plötzlich auf einen viel tieferen Wert hinunterstürzt, den sie im weiteren Verlauf bei-

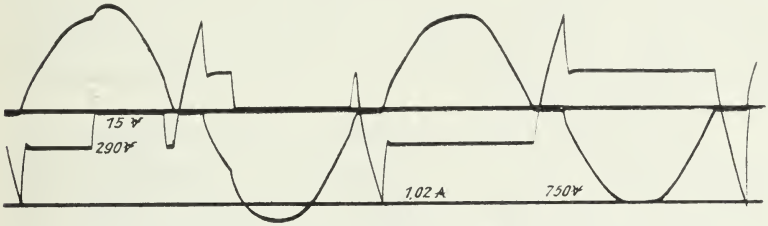
1) G. Lange, Ann. d. Phys. **32.** p. 593, Fig. 4. 1910.

2) Guye, L'Eclairage electrique **34.** p. 305; **35.** p. 18. 1903; Monasch, Der elektrische Lichtbogen, p. 80. 1904.

behält.[1]) Dieser konstante Spannungswert, der während des Entladungsvorganges besteht, soll im folgenden „*Entladungsspannung*“ genannt werden. Im Sinne der Ayrtonschen Gleichung

$$e = \frac{a}{i} + b$$

(e Spannung, i Strom, a und b Konstante) bedeutet das, die Konstante a ist sehr klein. Auch früher wurde schon behauptet, daß bei Metallen a klein sein müsse, und Barkhausen[2]) zeigte, daß aus dem hierdurch gegebenen Verlaufe der Charakteristik eines Lichtbogens die geradlinige Abnahme der



$l = 0{,}1$ mm. Frequenz 50. Ag-Platten in Luft.
Fig. 1.

Schwingungsamplitude folgt, wie man sie in einem durch Funken erregten Schwingungskreise beobachtet.

Darauf wurde der Zündspitze und ihrer Anomalie allein die Aufmerksamkeit zugewandt und mit ihrer Hilfe die Zündspannung in Abhängigkeit von den verschiedensten Versuchsbedingungen: effektiver Stromstärke, Elektrodenmaterial, Frequenz, umgebendem Gase und dessen Druck qualitativ untersucht.

Als es schließlich gelungen war, alle Unregelmäßigkeiten zu beseitigen und wohldefinierte Verhältnisse zu schaffen, konnte die Beziehung zwischen Zündspannung und Elektrodenabstand durch exakte Messungen verfolgt werden.

Zum Schlusse wurde versucht, die Ergebnisse ionentheoretisch zu deuten.

---

1) Daß in der Fig. 1 die Spannung im ersten Augenblick nach dem steilen Absturze vom Zündgipfel einen etwas kleineren Wert annimmt, ist nur scheinbar und durch die Eigenschwingungen der Oszillographenschleife verursacht. (Vgl. darüber III.)

2) Barkhausen, Physik. Zeitschr. 8. p. 624. 1909.

III. Versuchsanordnung.

a) Oszillograph.

Der Strom- und Spannungsverlauf wurde mit Hilfe eines Duddellschen Hochfrequenzoszillographen aufgezeichnet.

Die Beobachtung so rascher Stromänderungen, wie sie durch die Zündspitzen verursacht werden, verlangt, daß der Oszillograph die oszillographischen Bedingungen genau erfüllt, d. h., daß er die von der Theorie[1]) vorgeschriebene Dämpfung mit dem Dämpfungsverhältnis $k = 23$ besitzt. Die geeignete Dämpfung ergab eine Mischung von Paraffinöl mit 6 Gewichtsprozenten Petroleum, die als dämpfende Flüssigkeit verwandt wurde; sie machte allerdings infolge ihrer Dünnflüssigkeit eine häufige Neufüllung nötig. Der übrigbleibende Fehler in der Abbildung lag innerhalb der Grenzen der Meßgenauigkeit, die etwa 3 Proz. betrug.

Die Messung der Zündspannung geschah anfangs in folgender Weise: Der von der Lichtquelle kommende Strahl wurde durch einen mit der Hand betriebenen Verschluß nur für einige Perioden zum Spiegel der Oszillographenschleife und zu der mit Negativpapier bespannten Trommel zugelassen. Dann bildete sich durch die entstehende Lichtlinie der Spannungsausschlag ab; dieser wurde mit einem nach Halbmillimetern geteilten Maßstabe ausgemessen und entsprechend einer Eichung (vgl. unter b) auf Volt umgerechnet. Dadurch, daß eine große Anzahl zusammengehöriger Werte der Zündspannung und des Elektrodenabstandes vermittelt wurde, ließen sich direkt Kurven aufnehmen, welche die Zündspannung als Funktion des Elektrodenabstandes darstellten. — Später wurden die Perioden getrennt auf der langsam bewegten Trommel registriert, so daß aus einer Reihe von Zündungen das Mittel gebildet werden konnte.

b) Schaltung.

Die Schaltung ergibt sich aus der nebenstehenden Skizze (Fig. 2); in dieser bedeuten:

A_1 Milliamperemeter (Hitzdraht) bis 200 MA.

A_2 Milliamperemeter (Elektrodynamometer) bis 60 MA.

---

1) Blondel, C. R. p. 116. 748; H. Busch, Physik. Zeitschr. 13. p. 623. 1912.

F Funkenstrecke.
J Induktorium.
O Oszillographenschleife.
W Wechselstrommaschine (Frequenz 50), deren Fremderregung reguliert werden kann durch
R_1 Widerstand.
R_2 Widerstand bis 150000 Ω in 15 Stufen.

Das Milliamperemeter A_1 mißt die Summe von Oszillographen- und Entladungsstrom; um den ersteren in Abzug bringen zu können, wurde auch in den Kreis der Oszillographenschleife ein Milliamperemeter A_2 eingeschaltet.

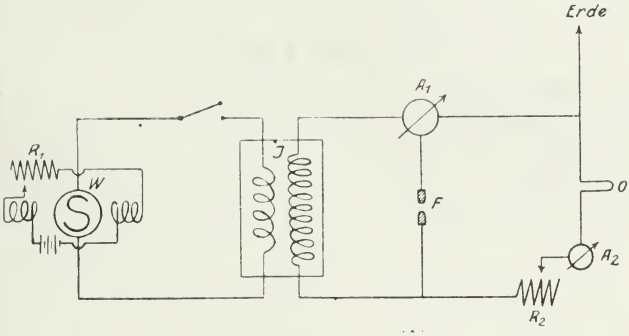


Fig. 2.

Die Spannungseichung erfolgte mit Wechselstrom, indem die Effektivspannung mit einem Braunschen Elektrometer gemessen und gleichzeitig die maximale Spannungsamplitude im Oszillographen beobachtet wurde.

c) Funkenstrecke.

Um die Bedingungen der Zündung möglichst vielseitig variieren zu können, wurde eine Funkenstrecke konstruiert, die man in verschiedene Gase von variablem Drucke einbetten konnte. Auch erwies es sich als notwendig, die Elektroden zu kühlen.

Ein Exsikkator mit vier sich diametral gegenüberliegenden Tuben fand hierbei Verwendung. Durch zwei dieser Tuben sind je zwei dünne Messingrohre zur Wasserkühlung der Elektroden eingeführt, und zwar in Schliffe eingekittet, so daß sie leicht herausgenommen werden können. Durch jeden dieser

Schliffe geht außerdem noch ein Glasrohr mit Hahn zur Einleitung von Gasen und zur Evakuierung. In den dritten Tubus ist ein Gefäß für P_2O_5 eingeschliffen, in dem vierten schließlich dreht sich ein Schliff mit zwiebelförmiger Erweiterung und angesetztem Glasrohre, in dem eine Spindel mit Gewinde zur Regulierung des Elektrodenabstandes eingekittet ist. Der Winkel dieses Konus wurde möglichst groß gewählt, um bei der häufigen Bewegung, die gerade diesem Schliffe zugemutet werden muß, ein Festfressen zu vermeiden. Im Inneren ist auf einem Hartgummibrette, das durch vier Schrauben in jeder Höhe festgehalten werden kann, der eine Elektrodenträger befestigt, der andere dagegen auf einem Messingschlitten, der mit einem Muttergewinde für die Spindel versehen ist und durch diese von außen gegen den feststehenden Träger zentrisch bewegt werden kann. Die sorgfältig geschnittenen Gewinde haben eine Ganghöhe von 1 mm und gestatten eine Feinheit der Einstellung auf mindestens 0,01 mm. Die Nullpunkteinstellung geschah immer so, daß während des Funkenüberganges die Elektroden einander bis zum Erlöschen des Funkens genähert wurden — eine Methode, die große Genauigkeit erzielen läßt. Mittels eines Teilkreises, der mit der Spindel zentriert ist, läßt sich der Elektrodenabstand ablesen. Fehler, die toter Gang der Gewinde mit sich bringen könnte, werden durch zwei Federn vermieden, die sich bei Näherung der Elektroden anspannen. Die Elektroden sind 1,5 bis 3 mm lang und haben einen Durchmesser von 0,5 cm. Um immer gut miteinander zentriert zu sein, sind sie am Stirnende kugelig abgedreht. Etwa 5 mm von diesem entfernt ist durch jede Elektrode ein dünnes Kühlrohr quer hindurchgeführt und kann durch einen Schlauch mit den Zuleitungsrohren, die durch die Tuben eintreten, verbunden werden. Auf diese Weise ist ein bequemes Auswechseln der Elektroden möglich, die in ihren Trägern aus Hartgummi durch Schrauben gehalten werden. Die Zuführung des elektrischen Stromes wird durch die Kühlrohre vermittelt. Die Versorgung mit Kühlwasser muß aus getrennten und isolierten Gefäßen vorgenommen werden, da sonst infolge der hohen Spannungen leicht ein Nebenschluß auftritt. Dasselbe gilt auch für den Abfluß des Kühlwassers, der tropfenweise erfolgte.

Der Exsikkator war auf einem Brette montiert und konnte

horizontal und vertikal gestellt werden. Die Messungen wurden immer bei vertikal stehender Funkenstrecke vorgenommen, da bei horizontaler Lage der gemessene Elektrodenabstand nicht die wahre Länge der Strombahn angibt; denn die erwärmten aufsteigenden Gase treiben die Entladung in die Höhe und verlängern sie dadurch. Diese Maßnahme bewirkt allerdings eine Unsymmetrie der Spannungswerte an beiden Elektroden, die, durch verschieden starke Erwärmung der Elektroden verursacht, bei Kühlung aber nur gering ist. Im übrigen war sie für die Messungen bedeutungslos, da nur die Werte immer ein und derselben Seite Verwendung fanden.

IV. Qualitative Untersuchungen.

Guye und Monasch haben die Vermutung ausgesprochen[1]), die Anomalien der kritischen Zone seien elektrischen Schwingungen zuzuschreiben, die dadurch entstehen könnten, daß die Zuführungen zu den Elektroden ein schwingendes System darstellten, welches durch die Entladungen zum Schwingen angeregt würde. In Wirklichkeit hätte man also nicht eine Entladung niedriger, sondern hoher Frequenz. Daß solche Schwingungen möglich sind, ist aus vielfachen Untersuchungen bekannt.[2]) Die Zuleitungsdrähte bilden dabei eine Art von Hertzschem Oszillator, der durch die Wechselstromentladungen in Schwingungen versetzt wird.

Die Anordnung von Guye und Monasch ist nun in der Tat geeignet, Schwingungen dieser Art zu erzeugen, um so mehr, da sie ein Elektrometer, parallel zur Funkenstrecke geschaltet, enthält, dessen Kapazität die Schwingungen begünstigen muß. Das Vorhandensein von Schwingungen wird auch durch ihre Beobachtungen im rotierenden Spiegel sehr wahrscheinlich gemacht, die zeigen, daß jede Entladung in eine Anzahl von Teilentladungen zerfällt.

Meine ersten Versuche gingen nun dahin, zu prüfen, ob in der Tat die Anomalien der kritischen Zone durch solche Schwingungsvorgänge erklärt würden. Es gelang auch mit Hilfe eines Drudeschen Wellenmessers Schwingungen nach-

1) l. c.

2) Stschodro, Ann. d. Phys. 27. p. 225. 1908; Duddell, Elektr. 61. p. 796. 1908.

zuweisen, deren Frequenz der Größenordnung nach mit der Eigenfrequenz des Kreises: Zuleitungsdrähte — Funkenstrecke — parallel geschaltetes Elektrometer geringer Kapazität — übereinstimmte. Auch wenn das Elektrometer fortgelassen wurde, traten sie auf. Daher wurden von nun an die einfachen Zuleitungsdrähte zu den Elektroden durch große induktionsfreie Widerstände ersetzt und die Elektroden zur Vermeidung kapazitiver Wirkung möglichst klein gewählt.

Aber auch bei dieser Anordnung blieben die Erscheinungen der kritischen Zone bestehen. Zunächst wurden sie mit Hilfe einer ultraviolett bestrahlten Hilfsfunkenstrecke beobachtet, welche parallel zur Hauptfunkenstrecke, durch Flüssigkeitswiderstände mit dieser verbunden, lag, und so die maximalen Entladungsspannungen zu messen gestattete. Hierbei ergab sich für die Abhängigkeit der Zündspannung von dem Elektrodenabstande eine Kurve, welche der von Guye und Monasch für die Effektivspannung gefundenen sehr ähnlich ist.

Mehr Aufschluß als aus solchen Messungen der effektiven und maximalen Spannungswerte war aus einer oszillographischen Beobachtung zu erwarten. Diese zeigte die schon unten beschriebene Erscheinung (Figg. 3, 4), daß die Zündspitze von Halbperiode zu Halbperiode starken Schwankungen innerhalb der kritischen Zone unterworfen ist, daß aber die Spannung im übrigen während des Stromdurchganges, die „Entladungsspannung", immer denselben fast konstanten Wert aufweist. Hieraus war zu schließen, daß lediglich die Zündspitzen für das unregelmäßige Verhalten der Effektivspannung verantwortlich zu machen sind. Es hätte ja auch die andere Möglichkeit vorliegen können, daß die Zündspannung konstante Werte, die Entladungsspannung dagegen Unregelmäßigkeiten zeigte, indem die Entladung z. B. zwischen der Glimm- und Bogenstromform hin und her sprang. Derartiges findet auch wirklich gelegentlich statt, wie Figg. 1 und 3 zeigen: Die Entladungsspannung wechselt zuweilen sprunghaft zwischen zwei Werten, etwa 600 und 15 V. Bei den Stromstärken, die in den folgenden Untersuchungen zur Anwendung kamen, traten jedoch fast ausschließlich die höheren Entladungsspannungen auf; es handelt sich hier also nicht um eine Bogen-, sondern um eine *Glimmentladung*. Wenn die Zündspitzen

allein diese Schwankungen veranlassen, kann eine Gleichstromentladung die Eigenschaften der kritischen Zone nicht besitzen, wie Guye und Monasch vermuten. Die experimen-

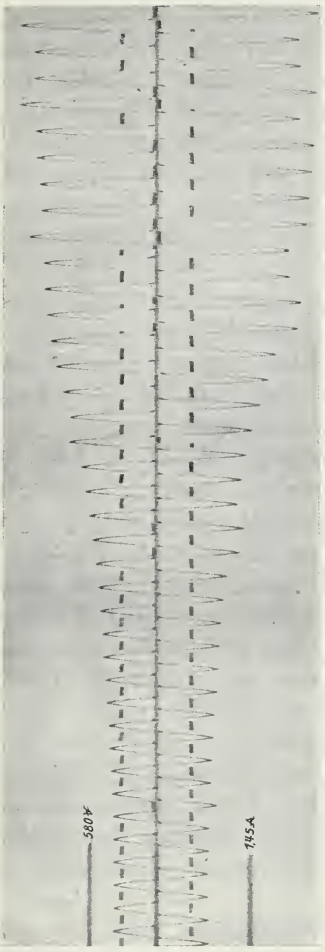


Fig. 3. Cu-Platten in Luft. $l = 0{,}1$ mm. 0,46 bis 1,45 $A_{\text{eff.}}$

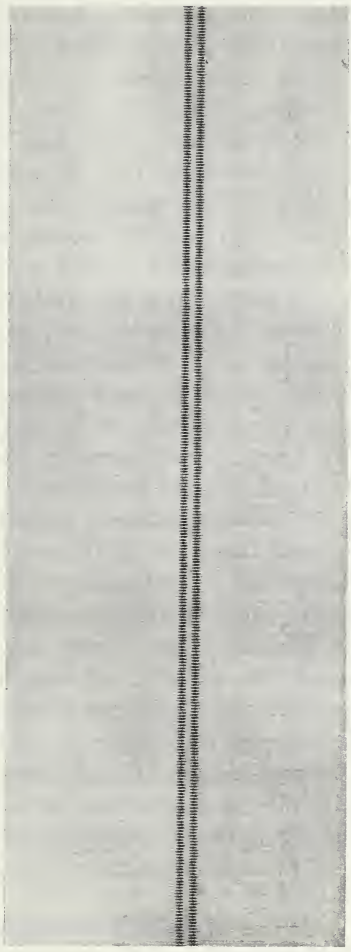


Fig. 4. Cu in Luft. $l = 2{,}0$ mm. 0,09 $A_{\text{eff.}}$

tellen Untersuchungen[1]), welche in dieser Richtung unternommen wurden, zeigten auch nichts Derartiges.

Um nun Anhaltspunkte darüber zu gewinnen, worin wohl die Ursache der kritischen Erscheinungen zu finden

1) Vgl. auch Kowalski, C. R. 138. p. 487. 1904.

sei, wurden die Versuchsbedingungen in den verschiedensten Richtungen variiert. Aber weder der Wechsel des Elektrodenmaterials noch die Änderung der Frequenz des Wechselstromes (es wurde bis auf 6 Perioden heruntergegangen) ergaben eine merkliche Änderung im Verhalten. Da auch die Vermutung vorlag, daß Oxydbildung an den Elektroden von Einfluß wäre, wurde die Entladung in einer sorgfältig hergestellten Wasserstoffatmosphäre[1]) beobachtet. Dabei stellte sich heraus, daß die Zündspannungen der kritischen Zone im Mittel kleiner als in Luft sind, und daß sich der Bereich der kritischen Zone bis zu erheblich größeren Elektrodenabständen erstreckt als in Luft. Selbst bei 10 mm Abstand konnten in H noch Anomalien bemerkt werden.

Ersetzte man die Luft durch Kohlensäure, die, in der üblichen Weise getrocknet, aus einer Bombe eingeleitet wurde, so traten im wesentlichen keine Änderungen gegenüber den Erscheinungen in Luft ein, nur die Zündspannungen der kritischen Zone lagen hier im Mittel etwas höher.

Verminderung des Druckes bewirkte sowohl in Luft als in CO_2 und H eine Ausdehnung des Bereiches der kritischen Zone.

Elektrodenkühlung äußerte ihren Einfluß darin, daß die Erscheinungen der kritischen Zone auch noch bei viel größeren Stromstärken auftraten, als diejenigen waren, mit denen Guye und Monasch arbeiteten. So wurde bei Kühlung die kritische Zone noch bis 0,25 A_{eff} festgestellt, ohne daß damit die Grenze erreicht war; nur die Apparatur verbot die Anwendung höherer Stromstärken. Mit Hilfe einer anderen Anordnung, die jedoch nur eine Beobachtung bei kleinen Elektrodenabständen zuließ, konnten die Anomalien noch bei 1,45 A_{eff} nachgewiesen werden. Dies zeigen die Kurven der Fig. 3, die unter gleichzeitiger Vergrößerung der Stromamplitude (Verkleinerung des Vorschaltwiderstandes) aufgenommen

---

1) Der Wasserstoff wurde auf elektrolytischem Wege dargestellt (Ni-Elektroden in KOH), zur Absorption von etwa vorhandenem Sauerstoffe durch eine Waschflasche mit Kaliumpyrogallat (5 g Pyrogallol, 120 g KOH, 95 g H_2O nach Travers: Experimentelle Untersuchung von Gasen, p. 83), dann durch eine zweite Waschflasche mit konzentrierter Schwefelsäure und schließlich durch ein P_2O_5-Rohr zum Trocknen hindurch in den Exsikkator geleitet. Der Exsikkator war vorher mit einer Wasserstrahlpumpe evakuiert. Auspumpen und Auffüllen wurde mehrfach wiederholt, um alle Reste fremder Gase zu beseitigen.

wurden. Die hierbei benutzten Plattenelektroden bürgen jedenfalls für eine gute Kühlung.

Eine deutliche Einwirkung übte schließlich die *ultraviolette Bestrahlung* der Elektroden aus. Die Bestrahlung wurde dadurch ermöglicht, daß in dem Deckel des Exsikkators ein Quarzfenster angebracht war. Durch eine Quarzlinse mit dem Durchmesser von 5 cm und der Brennweite von 9 cm wurden die ultravioletten Strahlen einer Gleichstromkohlenbogenlampe von 20 Amp. auf der unteren der beiden Elektroden konzentriert, und zwar in der größtmöglichen Intensität, die erreicht wird unter der Bedingung:

Lichtabstand = Bildweite = doppelte Brennweite.

Die Wirkung der Bestrahlung läßt Fig. 4 erkennen: es tritt momentane Beruhigung der Schwankungen, Einstellung auf einen konstanten Spannungswert ein, und zwar immer auf der Seite der bestrahlten Elektrode. Einschaltung einer Glasplatte in den Strahlengang hebt den Effekt sofort auf. Man hat es also offenbar mit einer Erscheinung zu tun, die mit dem von Warburg[1]) beobachteten Entladeverzug zusammenhängt. Bei den größeren Abständen, bei denen auch ohne Bestrahlung konstante Werte bestehen, änderte die Bestrahlung nichts. Ist die Entladung längere Zeit hindurch in Luft oder CO_2 unterhalten, so versagt die photoelektrische Wirkung, die bisher konstanten Zündspannungen nehmen wieder unregelmäßig erhöhte Werte an. Namentlich an Zn- und Pb-Elektroden, die starke Schichten voluminöser Oxyde schon nach kurzer Brenndauer bilden, macht man diese Beobachtung; erst nach Beseitigung der Oxyde durch Abdrehen tritt der Einfluß der Bestrahlung von neuem hervor.

Die letztere Erscheinung verschwindet nahezu bei vermindertem Gasdrucke infolge der geringen Oxydbildung, in H sogar völlig.

V. Quantitative Untersuchungen.

Nachdem in der ultravioletten Bestrahlung ein Mittel gefunden war, die Unregelmäßigkeiten der Zündspannung fortzuschaffen und bis zu kleinen Elektrodenabständen reproduzierbare Werte zu erhalten, konnten zuverlässige Messungen unternommen werden.

---

1) Warburg, Wied. Ann. **59.** p. 1. 1896; **62.** p. 385. 1897.

Die Aufnahme der Kurven, die zur Auswertung dienten, erfolgte in der unter IIIa beschriebenen Weise meist bei langsam bewegter Trommel.

Es wurden die *Zünd-* und *Entladungsspannungen* bei ultravioletter Bestrahlung *gemessen* in *Abhängigkeit* von: Bogenlänge, effektiver Stromstärke, Elektrodenmaterial, umgebendem Gase, Gasdruck.

Als Elektrodenmaterial kamen Cu, Zn, Cd, Al zur Verwendung, Metalle, die alle in guter Reinheit erhältlich waren. Die Elektroden wurden stets gekühlt. Die Gase, in denen die Entladung untersucht wurde, waren Luft, H und CO_2. Die Resultate dieser Messungen stellen die Figg. 5 bis 16 dar. In diesen ist immer als Ordinate die Zündspannung in Volt (aus den Oszillogrammen ermittelt), der Elektrodenabstand als Abszisse in Millimetern angegeben; der letztere wurde bei allen Meßreihen variiert, während die übrigen Versuchsbedingungen konstant blieben. Es wurden für alle Elektrodenmaterialien immer wieder dieselben Verhältnisse gewählt, um einen Vergleich der Einflüsse der verschiedenen Größen zu ermöglichen.

Von Kupfer, das sich für die Untersuchung als sehr geeignetes Material erwies, infolge seines hohen Schmelzpunktes und der geringen Oxydbildung, wurde eine große Zahl von Meßreihen aufgenommen, um die wirkliche Konstanz der Spannungswerte, ihre Unabhängigkeit von etwaigen anderen Faktoren und gleichzeitig die Meßgenauigkeit festzustellen. Hierbei fanden sich im allgemeinen keine Abweichungen über 3 Proz.; hier und da kamen auch Schwankungen bis zu 8 Proz. vor, die aber immer auf Luftwirbel zurückgeführt und durch geeignete Maßnahmen vermieden werden konnten. Was die Art des umgebenden Gases betrifft, so ist namentlich bei Luft und CO_2 zu bedenken, daß diese Gase durch elektrische Entladungen chemische Veränderungen erleiden: der Stickstoff und Sauerstoff der Luft verbinden sich zu Stickoxyden und CO_2 wird gespalten. Ähnlich verhält es sich mit dem Elektrodenmateriale: die Elektroden oxydieren sich und die Entladung geht nicht an dem reinen, sondern an dem oxydierten Metalle vor sich. Der Umstand, daß nur äußerst schwer quantitativ reine eindeutige Verhältnisse hergestellt werden können, ist einer der Umstände, welche der Klärung der Lichtbogenerscheinungen große Schwierigkeiten in den Weg legen.

Die oberen Kurven der Fig. 5 stellen die Zündspannung als Funktion des Elektrodenabstandes bei drei verschiedenen effektiven Stromstärken dar, dieselben, die auch bei jeder Meßreihe wieder verwandt wurden, nämlich bei 0,09, 0,07, 0,05 A_{eff} in Luft und unter Atmosphärendruck. Zunächst fällt hier auf, daß der Verlauf der Kurve trotz Bestrahlung ein ganz ähnlicher geblieben ist wie bisher: von den Abständen an, bei denen die Unregelmäßigkeiten im Falle fehlender Bestrahlung einsetzen, steigen die Kurven, wölben sich gegen die Abszissenachse und nähern sich schließlich für $\lim L = 0$ einem Spannungswerte > 0. — Im folgenden soll auch weiterhin der Bereich, in dem sich die Zündspannung proportional dem Elektrodenabstande ändert, normale Zone, der Bereich, in dem sich Abweichungen von diesem Verhalten zeigen, kritische Zone heißen.

Die Werte für $L < 0{,}25$ mm konnten nicht exakt bestimmt werden, da die Intensität der Bestrahlung infolge gegenseitiger Beschattung der Elektroden nicht ausreichte oder bei streifendem Einfalle zu schwach war, um die Schwankungen zu beseitigen; aus demselben Grunde war es auch nicht möglich, Kurven für Plattenelektroden aufzunehmen.

Weiter ersieht man aus der Fig. 5, daß die Kurven der Zündspannung mit abnehmender Stromstärke zu immer höheren Spannungswerten rücken, wie das auch aus der Lichtbogentheorie zu erwarten ist. Ein einfaches Gesetz hierfür kann man jedoch weder feststellen noch vermuten.

Die unteren Kurven der Fig. 5, die in dem auf der rechten Seite angegebenen Maßstabe gezeichnet sind, geben die Abhängigkeit der Entladungsspannung von dem Elektrodenabstande wieder. Die Entladungsspannung zeigt im Bereiche der kritischen Zone keine Anomalie, sondern wächst immer proportional mit dem Elektrodenabstande. Durch Bestrahlung wird sie gar nicht beeinflußt. Mit der Stromstärke ändert sie sich im gleichen Sinne wie die Zündspannung, d. h. sie wächst mit abnehmender Stromstärke.

Da Variation der Stromstärke bei sämtlichen Versuchsbedingungen immer wieder ganz analoge Resultate wie Fig. 5 lieferte, ist es nicht nötig, die bei verschiedenen Stromstärken erhaltenen Messungen im folgenden sämtlich anzugeben; vielmehr genügt es, nur die bei einer Stromstärke, 0,09 A_{eff}, gewonnenen Kurven mitzuteilen.

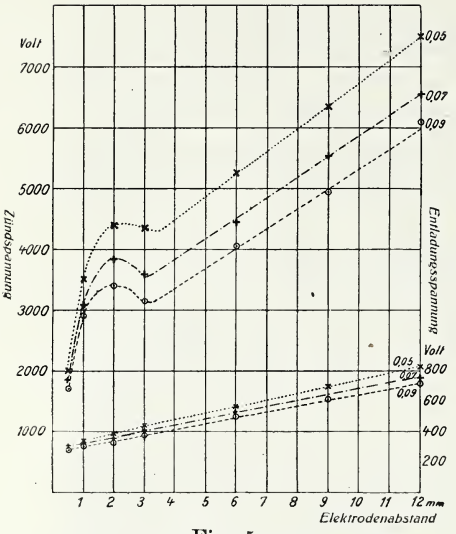


Fig. 5.
Cu in Luft bei Atmosphärendruck;
verschiedene Stromstärken
× 0,05 A_{eff}
\+ 0,07 „
⊙ 0,09 „

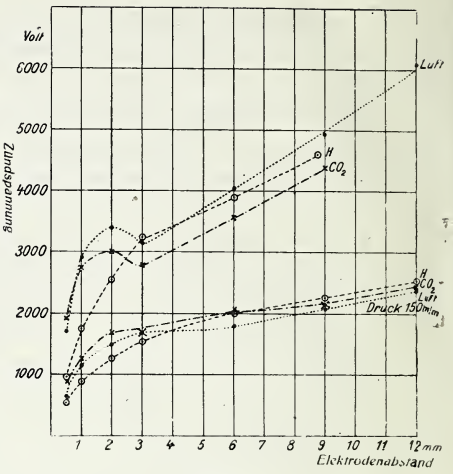


Fig. 6.
Cu in

Luft	•	Druck 743 mm	0,09 A_{eff}
		„ 150 „	
H	⊙	„ 743 „	
		„ 150 „	
CO_2	×	„ 755 „	
		„ 150 „	

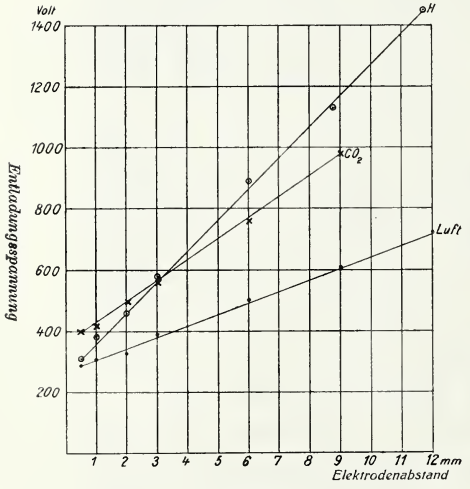


Fig. 7.
Cu in Luft •
H ⊙
CO_2 ×
bei Atmosphärendruck; 0,09 A_{eff}

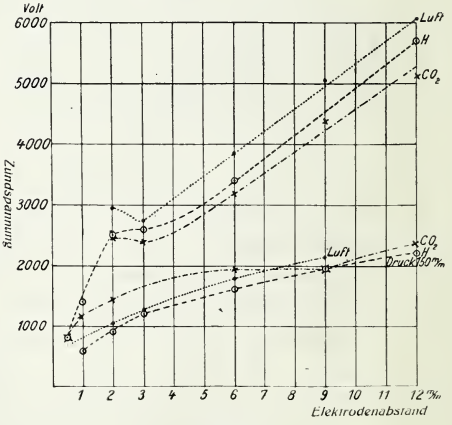


Fig. 8.
Cd in

Luft	•	Druck 755 mm	0,09 A_{eff}
		„ 150 „	
H	⊙	„ 743 „	
		„ 150 „	
CO_2	×	„ 755 „	
		„ 150 „	

In Fig. 6 ist die Zündspannungskurve für **Kupfer**-Elektroden *in verschiedenen Gasen* bei Atmosphären- und bei vermindertem Drucke dargestellt. In Luft liegen die Zündspannungen unter sonst gleichen Umständen im allgemeinen am höchsten, tiefer in H und am tiefsten in CO_2. Die Erhöhung der Kurven in der kritischen Zone äußert sich in Luft und CO_2 sehr stark, in H dagegen erheblich schwächer. Die Ausdehnung der kritischen Zone ist in H viel größer als in Luft und CO_2.

Die Entladungsspannungen (Fig. 7) wachsen in allen drei Gasen von kleinen Elektrodenabständen an immer proportional mit diesen; in Luft finden sich die tiefsten, höhere in CO_2 und in H die höchsten. Bei 3 mm etwa schneidet die H-Kurve die CO_2-Kurve und nimmt von hier ab tiefere Werte als die letztere an.

Bei vermindertem Drucke, 150 mm[1]), sind (Fig. 6 unten) die Werte der Zündspannung in Luft die niedrigsten und unterscheiden sich nur sehr wenig von den Werten in den anderen Gasen. Auffallend ist, daß die kritische Zone in Luft und CO_2 bei diesem Drucke zwar noch vorhanden ist, sich aber bis zu viel größeren Elektrodenabständen ausdehnt und eine bedeutend geringere Erhöhung zeigt als unter Atmosphärendruck. In H läßt sich die Erhöhung gar nicht mehr feststellen.

Ein ähnliches Verhalten wie Cu zeigen **Cadmium**-Elektroden in den verschiedenen Gasen, nur tritt hier in H die kritische Zone mehr durch ihre Erhöhung hervor (Fig. 8). Die sauerstoffhaltigen Gase ließen keine Messungen für Abstände unter 2 mm zu, da starke Oxydbildung die Wirkung der Bestrahlung aufhob. Von 3 mm an erscheint ausgesprochen die kritische Zone.

Bei Verminderung des Gasdruckes auf 150 mm (Fig. 8 unten) zeigen sich in Luft die höchsten Spannungswerte. In Luft wie in H kann man eine kritische Zone kaum erkennen; deutlich dagegen infolge des starken Anstieges in CO_2, wo sie weit ausgedehnt erscheint.

Einige Schwierigkeiten bereiteten die Messungen an **Zink**-Elektroden in Luft (Fig. 9). Denn schon nach ganz kurzer Brenndauer bildete sich derartig stark flockiges, voluminöses

1) Zu geringeren Drucken überzugehen war nicht möglich, da sonst von allen mit der Zuleitung verbundenen Metallteilen die Glimmentladung ausging und die Definition des Elektrodenabstandes ausschloß.

Oxyd, daß mit ultravioletter Bestrahlung innerhalb der kritischen Zone keine Konstanz der Spannungswerte zu erreichen war. In H ließ sich dagegen leicht beobachten und bei Atmosphärendruck eine ausgedehnte kritische Zone feststellen. H weist die tiefsten, Luft die höchsten Zündspannungen auf. Daß die H-Kurve die für Luft und CO_2 geltenden schneidet und unter ca. 9 mm größere Spannungswerte als diese besitzt, hat (wie auch in Figg. 6 und 10) seinen Grund darin, daß sich die kritische Zone mit ihren erhöhten Zündspannungswerten in H bis zu viel größeren Elektrodenabständen ausdehnt als in den anderen Gasen, d. h. dort noch besteht, wo in anderen Gasen schon die normale Zone herrscht.

Unter vermindertem Drucke ließen sich in Luft auch innerhalb der kritischen Zone Messungen vornehmen (Fig. 9 unten). Die Wölbung der Kurven in der kritischen Zone tritt deutlich hervor und setzt schon bei großen Elektrodenabständen ein. Die Reihenfolge der Kurven für die drei Gase in bezug auf ihre Höhenlage ist hier die gleiche wie bei Atmosphärendruck. Für die Entladungsspannung ergibt sich, wie auch bei Cu und Cd, eine umgekehrte Reihenfolge, nämlich: Luft, CO_2 und H.

Bei **Aluminium** vereitelte das stete Wandern des Bogens, das durch die Oxydbildung verursacht wird — wie die Beobachtung in H bestätigt — eine quantitative Bestimmung der Entladungsspannung. Diese schwankt infolge der Änderung der Bogenlänge von Periode zu Periode, springt auch häufig während einer Periode zwischen Glimm- und Bogenentladung hin und her. Die Aufnahme der Werte der Zündspannung, die bei Al geringere Schwankungen in der kritischen Zone aufweisen als bei anderen Metallen, gelingt dagegen leicht, namentlich dann, wenn die Elektroden möglichst oxydfrei gehalten werden. Die Kurven der Fig. 10 bieten nichts wesentlich Neues; die Zündspannungen der normalen Zone sind in Luft wieder am höchsten, dann folgen die in H und schließlich die in CO_2, sowohl bei Atmosphären- wie bei vermindertem Drucke. Die H-Kurve schneidet auch hier wieder die anderen Kurven aus dem schon oben angeführten Grunde.

Um die Abhängigkeit der Zünd- und Entladungsspannung vom Elektrodenmateriale übersehen zu können, sind die Kurven, die für verschiedenes Elektrodenmaterial unter im

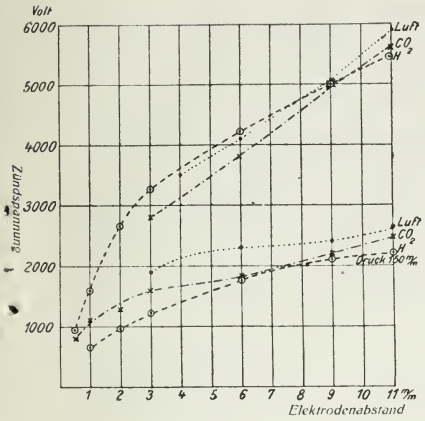


Fig. 9.

Zn in

Luft • { Druck 742 mm ; „ 150 „ }
H ⊙ { „ 746 „ ; „ 150 „ }
CO_2 × { „ 742 „ ; „ 150 „ }
} 0,09 A_{eff}

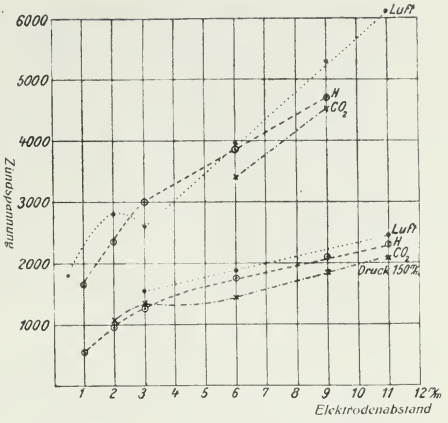


Fig. 10.

Al in

Luft • { Druck 748 mm ; „ 150 „ }
H ⊙ { „ 742 „ ; „ 150 „ }
CO_2 × { „ 740 „ ; „ 150 „ }
} 0,09 A_{eff}

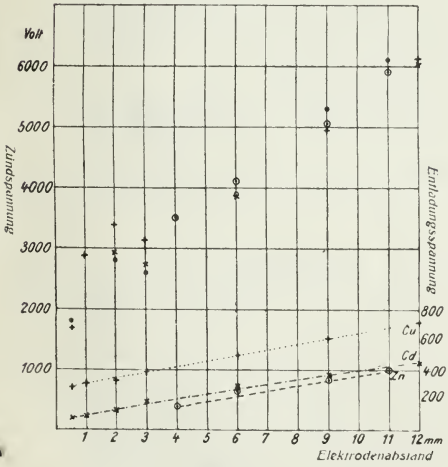


Fig. 11.

Cu +; Zn ⊙; Cd ×; Al •
in Luft bei Atmosphärendruck. 0,09 A_{eff}.

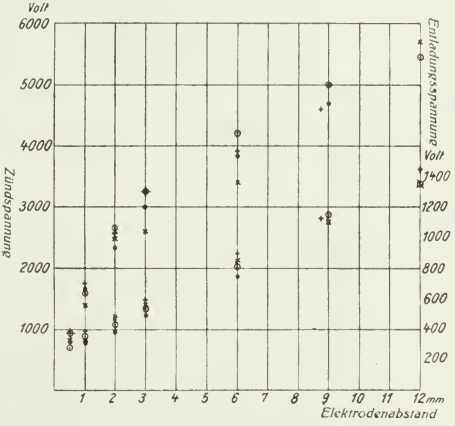


Fig. 12.

Cu +; Zn ⊙; Cd ×; Al •
in H bei Atmosphärendruck. 0,09 A_{eff}.

übrigen gleichen Verhältnissen erhalten wurden, in den Figg. 11 bis 19 nebeneinander eingetragen. Allgemein geht hieraus hervor, daß sich die Zündspannungen bei verschiedenen Elektrodenmaterialien in der normalen Zone nur wenig voneinander unterscheiden, in der kritischen Zone dagegen mehr. Das zeigt sich deutlich in Luft unter Atmosphärendruck (Fig. 11), in H (Fig. 12) und in allen Gasen bei vermindertem Drucke (Figg. 12 bis 16). In den letzteren Fällen, in denen die kritische Zone weit ausgedehnt ist, rücken die Werte der Zündspannungen erst bei großen Elektrodenabständen, beim Eintritt in die normale Zone, zusammen.

Anders verhält es sich mit CO_2 bei Atmosphärendruck (Fig. 13): auch in der normalen Zone ergeben sich größere Unterschiede in den Zündspannungen, besonders zwischen Cd und Zn.

Die Entladungsspannung weist eine starke Abhängigkeit von dem Elektrodenmateriale in den sauerstoffhaltigen Gasen auf, sowohl bei Atmosphärendruck (Figg. 11 und 13 unten, mit dem Maßstabe auf der rechten Seite) als auch bei vermindertem Drucke (Figg. 18 u. 19). In H (Fig. 12 unten und Fig. 19) liegen die Werte dagegen nahe zusammen. —

Von Interesse ist auch ein Vergleich der statischen Zündspannung[1]) mit der bei Wechselstrom auftretenden, der „dynamischen" Zündspannung. Er zeigt (Fig. 20), daß mit wachsendem Elektrodenabstande die Unterschiede zwischen beiden Zündspannungen erheblich zunehmen.

Wurde ein nicht zu schwacher Luftstrom während der Entladung in die Strombahn geblasen, ohne daß jedoch eine Verlängerung der Strombahn dadurch eintrat, so stiegen bei allen Elektrodenabständen die dynamischen Zündpotentiale

---

1) Die Bestimmung der statischen Zündspannung geschah in ähnlicher Weise wie durch Orgler (Ann. 1. p. 159. 1900). Von einer Influenzmaschine wurden einige Leydener Flaschen, die mit dem Elektrometer und der bestrahlten Elektrode in Verbindung standen, negativ aufgeladen. Geerdet waren der positive Pol der Maschine, die äußeren Belegungen der Flaschen, das Gehäuse des Elektrometers und die zweite Elektrode. Bei langsamer Steigerung des Potentials läßt sich die Zündspannung sehr scharf feststellen. Bei den kleineren Abständen fand ein Braunsches Elektrometer und bei den größeren ein Instrument von Carpentier, Paris, nach Abraham und Villard, mit einem Meßbereich bis zu 25000 Volt Anwendung.

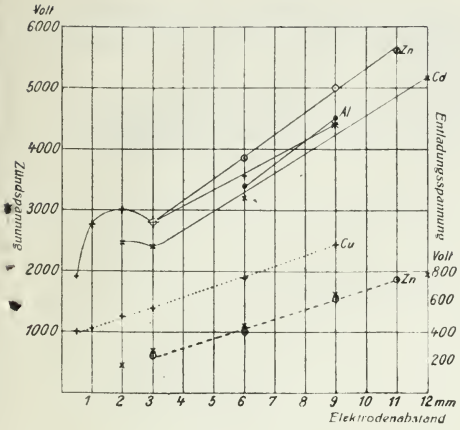


Fig. 13.
Cu +; Zn ⊙; Cd ×; Al • in CO_2
bei Atmosphärendruck. 0,09 Aeff

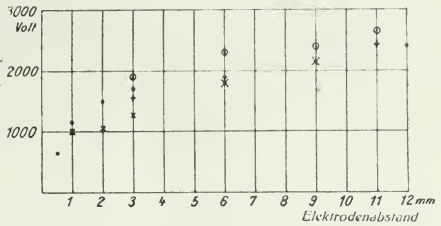


Fig. 14.
Cu •; Zn ⊙; Cd ×; Al + in Luft.
Druck 150 mm. 0,09 Aeff

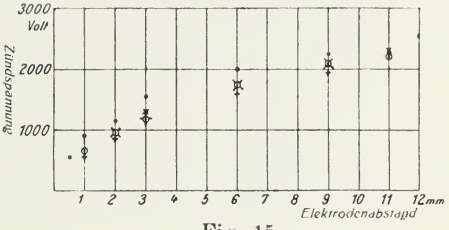


Fig. 15.
Cu •; Zn ⊙; Cd +; Al × in H.
Druck 150 mm. 0,09 Aeff

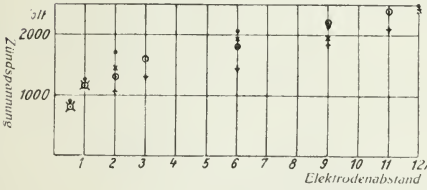


Fig. 16.
Cu •; Zn ⊙; Cd ×; Al + in CO_2
Druck 150 mm. 0,09 Aeff

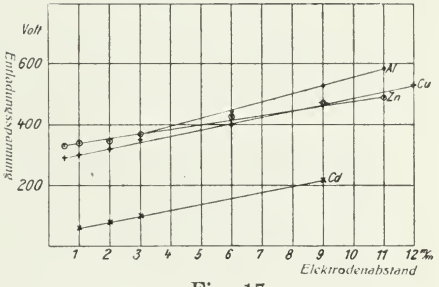


Fig. 17.
Cu +; Zn ⊙; Cd ×; Al • in Luft.
Druck 150 mm. 0,09 Aeff

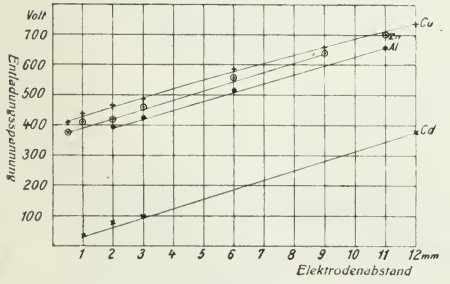


Fig. 18.
Cu +; Zn ⊙; Cd ×; Al • in CO_2.
Druck 150 mm. 0,09 Aeff

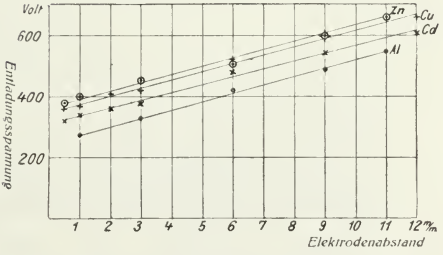


Fig. 19.
Cu +; Zn ⊙; Cd ×; Al • in H.
Druck 150 mm. 0,09 Aeff

plötzlich an und erreichten, wenn Bestrahlung angewandt wurde, die statischen Zündpotentiale, höhere unregelmäßige Werte, wenn nicht bestrahlt wurde.

Hieraus ist zu schließen, daß die nach Ablauf einer Periode in der Entladungsbahn zurückbleibenden leicht beweglichen

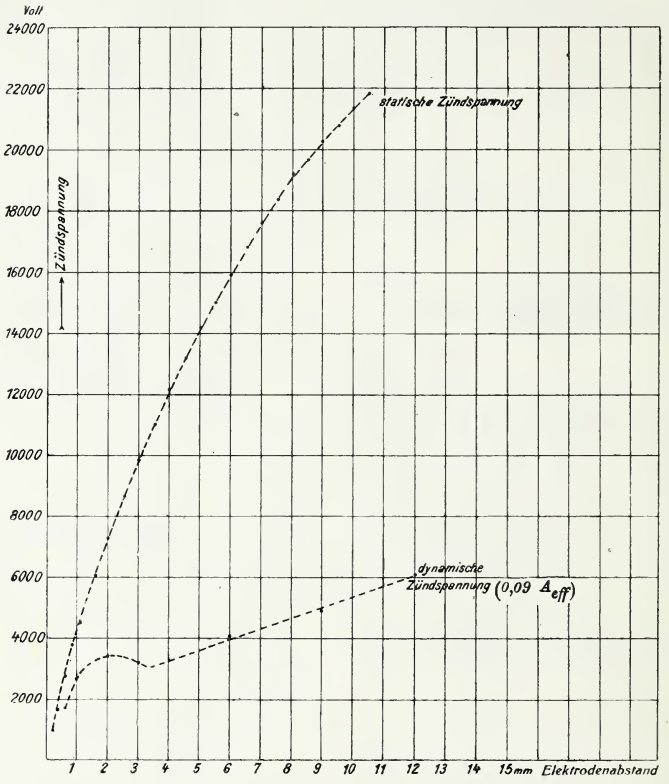


Fig. 20.

Cu in Luft. Normaldruck.

Ionen für den Unterschied zwischen statischer und dynamischer Zündspannung verantwortlich zu machen sind; die Zündspannung wird durch ihre Anwesenheit erniedrigt, erhöht, wenn sie fehlen. Das steht durchaus in Übereinstimmung mit früheren Beobachtungen und mit der dynamischen Theorie der Gasentladungen.

VI. Zusammenfassung.

1. Die von Guye und Monasch beobachtete Anomalie der Effektivspannung von Wechselstromentladungen zwischen Metallelektroden wird veranlaßt durch Unregelmäßigkeiten des Zündgipfels der dynamischen Charakteristik.

2. Es wurde nachgewiesen, daß diese Unregelmäßigkeiten durch Bestrahlung mit ultraviolettem Lichte zum Verschwinden gebracht werden können, daß sie also die dynamische Form des von Warburg entdeckten statischen Entladeverzuges sind.

3. Die Beziehung zwischen dynamischer Zündspannung und Elektrodenabstand behält in der kritischen Zone auch nach Beseitigung der Unregelmäßigkeiten durch Bestrahlung eine Anomalie bei.

4. Ihr Verlauf sowie der der Entladungsspannung wurden in Abhängigkeit von: effektiver Stromstärke, Elektrodenmaterial, umgebendem Gase und dessen Druck untersucht. Dabei ergab sich:

5. Die Ausdehnung der kritischen Zone ist in H größer als in Luft und CO_2, bei vermindertem Drucke größer als bei Atmosphärendruck.

6. Die Zündspannung liegt in Luft meist höher als in H und CO_2. Sie wächst *nur* in der normalen Zone proportional dem Elektrodenabstande.

7. Die Entladungsspannung wächst *immer* proportional dem Elektrodenabstande. In H hat sie die höchsten, in CO_2 tiefere und in Luft die tiefsten Werte. Das Elektrodenmaterial hat auf die Höhe der Zündspannung nur in CO_2 einen größeren Einfluß. Die Entladungsspannung ist dagegen in beträchtlichem Maße von ihm abhängig.

VII. Diskussion.

Es bleibt nun zu untersuchen, wie die Ionentheorie der Gasentladungserscheinungen von den experimentellen Ergebnissen der vorigen Abschnitte Rechenschaft geben kann. Die Tatsachen, die erklärt werden müssen, sind folgende:

1. Die dynamische Zündspannung liegt durchweg tiefer als die entsprechende statische.

2. Die dynamische Zündspannung nimmt bei größerem Elektrodenabstande normalerweise linear mit diesem ab.

3. Von einem gewissen, von der Art des umgebenden Gases abhängigen und mit abnehmendem Gasdrucke wachsenden Elektrodenabstande an gilt die unter 2. genannte Beziehung nicht mehr, sondern es tritt mit abnehmendem Abstande eine Annäherung der dynamischen Zündspannung an die höher liegende statische ein.

4. In dieser „kritischen Zone" ist die Zündspannung überaus unregelmäßig; sie wird aber durch Bestrahlung der Kathode mit ultraviolettem Lichte auf einen festbestimmten, in der vorstehenden Beziehung 3. gekennzeichneten Wert gebracht.

Den Vorgang der *statischen Zündung* hat man sich folgendermaßen vorzustellen[1]):

Wird an eine Gasentladungsstrecke, die Ionen enthält, eine Spannung angelegt, so wandern die positiven Ionen zur Kathode, die negativen zur Anode, die letzteren im allgemeinen mit der größeren Geschwindigkeit. Die Folge hiervon ist, daß vor der Kathode ein Potentialsprung, der Kathodenfall, vor der Anode ein kleinerer, der Anodenfall, entsteht. Im Anodenfalle erhalten die aus dem Entladungsraume kommenden negativen Ionen eine Beschleunigung, so daß sie mit erheblicher kinetischer Energie behaftet auf die Anode auftreffen; im Kathodenfalle geschieht dasselbe mit den positiven Ionen. Diese bewirken durch ihren Aufprall auf die Kathode den Austritt von Elektronen. Die auf diese Art freigemachten Elektronen durchlaufen den Kathodenfall, erhalten in ihm kinetische Energie und bilden, wenn ihre Energie einen gewissen Betrag übersteigt, beim Zusammentreffen mit neutralen Molekülen durch Stoß neue positive und negative Ionen. Die neuerzeugten Ionen müssen eine Störung der bisherigen Potentialverteilung bewirken, in dem Sinne, daß sie den Kathodenfall abzutragen suchen. Dieser würde demnach alsbald verschwinden, mit ihm aber auch die Stoßionisation, wenn nicht die Elektrodenspannung weiter gesteigert würde. Geschieht dies, so dringt die Ionisierung von der Kathode aus immer weiter gegen die Anode hin vor, bis sie die ganze Entladungsbahn erfüllt hat. Nun stellt sich ein

---

1) Vgl. J. J. Thomson, Elektrizitätsdurchgang in Gasen; Townsend, Theory of Ionisation of Gazes by Collision. London 1910; J. Stark, Winkelmanns Handbuch: Die Elektrizität in Gasen.

stationärer Zustand ein, bei dem eine bestimmte Ionenverteilung mit dem zur Stoßionisation erforderlichen Kathodenfalle dauernd festgehalten wird. So ist klar, daß eine zur Verfügung stehende, genügend hohe Spannung genügend lange an der Entladungsstrecke angelegt bleiben muß, ehe die Entladung einsetzen kann, wie es sich bei den von Warburg entdeckten Erscheinungen des Entladeverzuges äußert. Wird die nötige Spannung nicht lange genug angelegt, so vermag die Entladungsbahn die dem Einsetzen der Entladung entsprechende „Struktur" nicht anzunehmen. Dabei liegt auf der Hand, daß der Entladeverzug zurückgedrängt oder aufgehoben werden kann, wenn man durch irgend ein Hilfsmittel die Einstellung der Gasstrecke in die Entladungsstruktur erleichtert. Ein solches Mittel hat man z. B. in der Bestrahlung der Kathode mit ultraviolettem Licht, eine Maßnahme, welche die aufprallenden positiven Ionen in ihrer Wirkung ersetzt, indem sie ebenfalls den Austritt von Elektronen aus einer Metalloberfläche veranlaßt. Eine Erniedrigung der Zündspannung kann hierdurch nicht verursacht werden, sondern lediglich eine Abkürzung des Einstellungsprozesses der Bahn in die zur statischen Entladung erforderliche Ionen- und Spannungsverteilung.

Man denke sich nun durch sekundäre Ursachen dafür gesorgt, daß die Gasstrecke bereits in reichlichem Maße Ionen enthält, wenn man die Spannung anlegt. In diesem Falle bedarf es einer viel kleineren Ionisierungsarbeit durch die Spannung, um den Stromdurchgang zu bewirken, da die schon vorhandenen Ionen bereit sind, die Entladung zu vermitteln. Zwar wird auch jetzt derselbe Kathodenfall erforderlich sein, um Stoßionisation hervorzurufen, die Gassäule selbst aber wird einen sehr viel kleineren Spannungsabfall bewirken als bei nicht oder schwach ionisierten Gasen; die Entladung wird in diesem Falle schon bei einer niedrigeren Spannung einsetzen, als wenn die Ionen erst durch Ionenstoß neu geschaffen werden müssen.

Etwas Derartiges hat man vor sich, wenn man die *Entladung mit Wechselspannung* betätigt: Die umkehrende Spannung findet von der Entladung der vorangegangenen Halbperiode noch reichlich Ionen vor, die außerdem infolge der hohen Temperatur der Entladungsbahn eine erhöhte Beweg-

lichkeit besitzen; dazu kommt, daß die Temperatur der Elektroden erhöht ist, und es einer geringeren Energie der aufprallenden positiven Ionen bedarf, um die Elektronen frei zu machen. Dies alles hat zur Folge, daß die dynamische Zündspannung gegenüber der statischen erheblich erniedrigt erscheint (Fig. 20), um so mehr, je schneller die Spannung wechselt. Die Dinge liegen hier ganz analog, wie sie von Simon[1]) bei dem Wechselstromlichtbogen beschrieben und erklärt worden sind.

Zu Beginn einer neuen Halbperiode wird die wachsende Spannung wiederum die gleiche Wanderung der vorhandenen Ionen bedingen wie im statischen Falle; dadurch tritt vor der Anode eine Verarmung der Gasstrecke an positiven, vor der Kathode an negativen Ionen ein. Bis zu dem Augenblicke, wo sich dadurch der zur Stoßionisation erforderliche Kathodenfall ausgebildet hat, wird der von positiven Ionen entblößte Bereich vor der Anode um eine gewisse Strecke in den Entladungsraum vorgedrungen sein, eine Strecke, die um so größer sein muß, je größer die Ionenbeweglichkeit ist. Wenn die Entladungsbahn eine genügende Länge hat, wird dieser Mangel an Ionen auf der Anodenseite von geringem Einflusse auf die Vorgänge an der Kathode und den ganzen Zündprozeß sein. Die zur Einleitung der Zündung erforderlichen positiven Ionen stehen eben dann immer noch in hinreichender Zahl aus der Entladungsbahn zur Verfügung, so daß die Zündspannung normale Eigenschaften besitzen wird. Daher zeigt sich auch unter diesen Umständen stets die einfache lineare Beziehung zwischen Elektrodenabstand und Zündspannung.

Wenn nun aber die von Ionen entblößte Anodenzone in die Vorgänge an der Kathode übergreift, werden die Verhältnisse geändert. Dann erhält die Bahn mehr und mehr den Charakter wie bei einer statischen Zündung: Die Begünstigung durch die vorangegangene Entladung fällt zum Teil fort, so daß die Zündspannung sich den statischen Werten nähern muß — das Resultat, welches die Beobachtungen ergeben haben (Fig. 20). Es ist zu erwarten, daß dieser Fall schon bei um so größeren Elektrodenabständen eintreten muß, je größer die Ionenbeweglichkeit ist, daß also bei vermindertem Drucke und in einer H-Atmosphäre die Erhöhung der Zünd-

1) l. c.

spannung schon bei größeren Abständen zu erkennen sein wird — was ebenfalls beobachtet wurde.

Daß das Zündpotential in dieser kritischen Zone großen Unregelmäßigkeiten ausgesetzt sein muß, geht auch aus diesen Vorstellungen hervor. Zunächst müssen zufällige Zustände der Kathodenoberfläche den Elektronenaustritt in sehr empfindlicher Weise beeinflussen; ferner können Gaswirbel und Strömungen die Ausbildung der Entladungsbahn stören, und schließlich wird es auch durchaus von Zufälligkeiten abhängen, wie rasch die zur Stoßionisation erforderlichen positiven Ionen in den Bereich des Kathodenfalles gelangen. So hat es nichts Auffälliges, daß die dynamische Zündspannung ebenso wie die statische starken Schwankungen unterliegt.

Wenn sich der Kathodenfall in einen Raum hinein erstreckt, der reichlich mit positiven Ionen versehen ist, wie das bei größeren Abständen nach unseren Vorstellungen der Fall ist, werden unter allen Umständen stets genug positive Ionen vorhanden sein, um die Entladung einzuleiten. Wenn aber, wie bei kleinen Abständen, der Kathodenfall in ein ionenarmes Gebiet hineinreicht, so werden die oben erwähnten Zufälligkeiten einen vorherrschenden Einfluß gewinnen. Wird aber die Kathode mit ultraviolettem Licht bestrahlt, so ist die Stoßionisation von der Zufuhr an Ionen unabhängig, und es kommen die normalen Zündspannungen zur Geltung.

Auch die *Entladungsspannung* zeigt nach den Messungsergebnissen ein Verhalten, wie es nach der Theorie der Gasentladung zu erwarten ist. Da sie der Ausdruck des stationären Zustandes der Wechselstsomentladung ist, besitzt sie dieselben Eigenschaften, die von der Gleichstromentladung her bekannt sind.

Hrn. Prof. H. Th. Simon möchte ich auch an dieser Stelle meinen aufrichtigsten Dank aussprechen für die freundliche Unterstützung, welche er dieser Arbeit entgegenbrachte.

Auch dem früheren Assistenten, Hrn. Dr. Hans Busch, bin ich für manchen wertvollen Ratschlag zu Danke verpflichtet.

Göttingen, Institut für angewandte Elektrizität, Juli 1913.

Lebenslauf.

Ich, Erich Merkel, bin am 7. November 1886 als Sohn des verstorbenen Universitätsprofessors Dr. jur. Johannes Merkel zu Göttingen geboren. Hier besuchte ich eine Privatvorschule und das humanistische Gymnasium, das ich Ostern 1905 mit dem Zeugnis der Reife verließ. An den Universitäten zu München und Göttingen studierte ich hierauf Physik und Chemie und bestand Herbst 1907 die chemischen Verbandsexamina. Nachdem ich von Herbst 1907 bis Herbst 1908 in Cassel meiner militärischen Dienstpflicht genügt hatte, widmete ich mich an den Universitäten Berlin und Göttingen dem Studium der Physik.

3 0112 072839050